물질순환모델을 이용한 오염부하의 영향에 관한 연구

조 은 일*

The Effects of Pollutant Loadings Using the Material Cycle Model

Eun Il CHO*

Abstract

The material cycle model was used to estimate the effects of pollutant loadings in Suyeong Bay. It is composed of the three-dimensional hydrodynamic model for the water quality.

As the results of three-dimensional hydrodynamic simulation, the computed tidal currents was clocwise flow for ebb tide and counter clocwise flow for flood ti

The coefficient of correlation between the simulated and observed COD, DIN and DIP at 15 stations in Suyeong were 0.920, 0.899 and 0.837, respectively.

The results of simulated COD, DIN and DIP distributions in Suyeong Bay, poilutant loadings from river affected significantly to the water quality and the marine ecosystem.

---

* 제주대학교 해양과학대학 해양환경공학과 강사

Ⅰ. 緖 論

수영만은 우리나라 남동해안에 위치해 있으며, 만구의 폭은 약 8㎞, 최대수심은 약 24m인 반원형의 개방적인 만으로서 해운대 동백섬 남단과 이기대를 연결하는 내만 해역으로 만내에는 국제적인 요트경기장과 광안리 해수욕장이 위치해 있고, 해운대 해수욕장이 인접해 있는 우리나라에서 제일 가는 관광지이나 이곳에 도시하천인 수영강을 비롯한 우동천, 광안천, 춘천, 대연천 그리고 용호천 등을 통하여 도시하수가 유입됨으로 인하여 수영만내 수질이 점차 오염되고 있어 수질관리대책이 시급한 실정이다[1].

해역의 수질관리를 행하기 위해서는 수질예측이 필요하며 수질을 예측하는 방법으로는 수질모델을 많이 이용하고 있다. 수질모델에 있어서 호소나 하천과 같은 경우에는 유동의 특성이 단순하여 1차원이나 2차원으로 모델화하여 사용되고 있으나 해양의 경우 복잡한 유동특성 뿐만 아니라 내부의 생·화학적 재과정이 복잡하게 얽혀져 있어 이들과 관계된 인자를 모델화하여 수질을 예측한다는데는 상당한 어려움이 있다[2]. 기존 연안해역을 대상으로 연구한 수질모델로는 1960년대에 Thomman[3]은 1차원 정상상태 모델을 Delaware만에 적용하였고 Leendertse et al.[4]는 2차원 정상상태 모델을 개발하였다. 연안역 수질모델의 3차원적 연구는 1970년대 Leendertse and Liu[5,6]의 연구를 시작으로 堀口 등[7], 中田[8] Hayter et al.[9]에 의해 수행되었으며 초기에는 부유물질과 같은 보존성 성분의 예측에 이용되었고 최근에는 부영양화 기구의 해명과 함께 물질순환모델과 부영양화 모델이 개발되어 이용되고 있다. 수영만의 경우, 연안의 수질예측에 관련된 연구를 보면 정[10], 조[1]가 2차원 오염물질 확산모델을 이용하여 주로 물리적인 분산, 확산, 희석을 중심으로하여 보존성 물질 또는 1차 감쇄속도를 고려한 부유물질의 확산 정도를 예측하였으나 생물체와 무생물체를 일괄하여 무기물질과 유기물질로 나누고 이들 상호간의 물질흐름을 취급하여 질소와 인 등 영양염류와 COD의 거동을 파악하는 물질순환 모델을 적용한 예는 거의 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 인구밀도가 높고 많은 공장지역이 밀집되어 있으며 하천을 통해 연안해역으로 직접 오염물질을 가중시킬 수 있는 수영만에 대해 물질순환모델을 적용하여 하천에 의한 오염부하의 영향을 평가하여 수영만의 수질관리 대책에 이용할 수 있는 기초자료를 제공하는데 목적이 있다.

Ⅱ. 材料 및 方法

1. 대상해역 및 현황조사

본 연구를 위해 대상지역으로 선정한 조사지역 및 오염부하량 조사지점은 Fig. 1에서와 같이 수영만의 경우는 15개의 정점을 선정하였다. 하천의 경우 수영강, 우동천, 광안천, 대연천 그리고 용호천을 선정하였다.

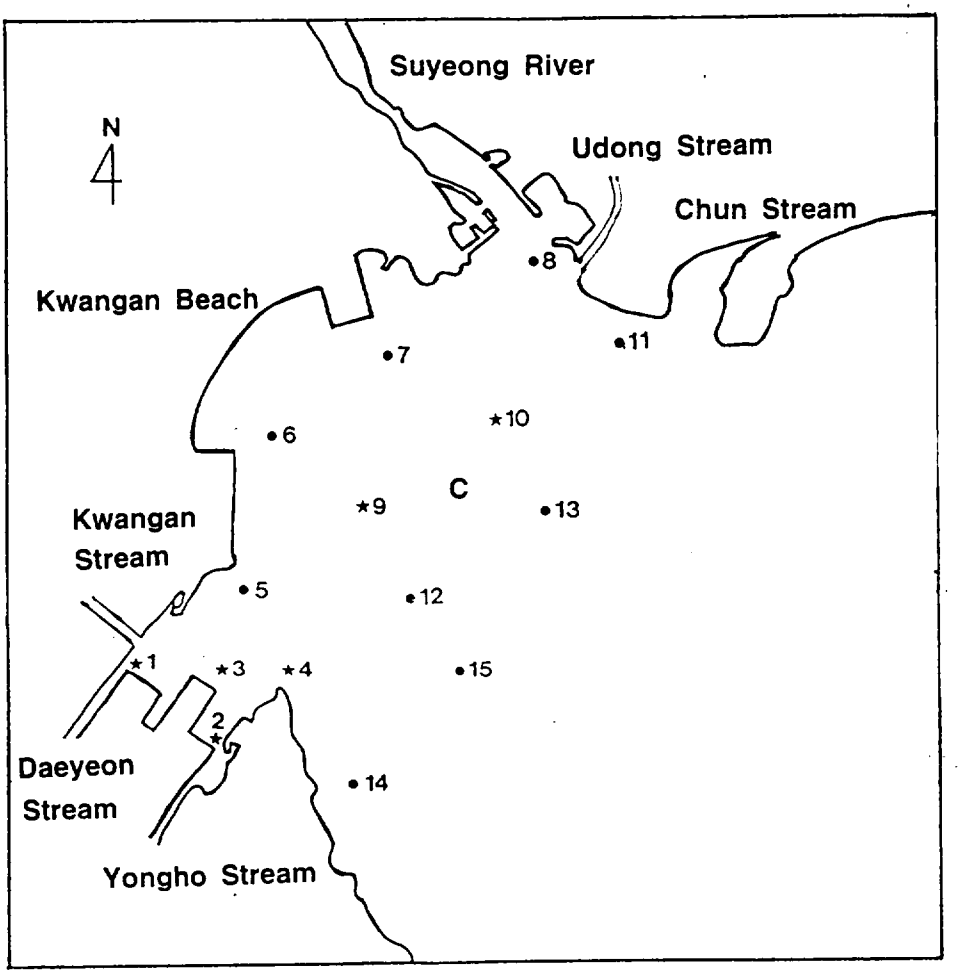

Fig. 1. Location of the sampling stations in Suyeong Bay.

수질측정은 조사지역 내의 지천과 만내의 수질 및 오염부하량을 조사하기 위해 2개월에 1회씩 1994년 2월부터 12월까지 조사하였다. 그리고 수질항목으로는 수온, pH, 용존산소(DO), 총부유물질(TSS), 화학적 산소요구량(COD) 그리고 영양염으로는 암모니아 질소(NH_4^+-N), 아질산 질소(NO_2^--N), 질산 질소(NO_3^--N), 총무기질소(TIN) 및 인산인(PO_4^{3-}-P, DIP)을 환경오염공정시험법과 Standard methods에 의해 측정하였다.

2. 물질순환모델의 구성

물질순환모델은 해수유동 시뮬레이션을 위한 다층모델과 수질 시뮬레이션을 위한 물질순환모델로 구성되어 있다.

2.1 3차원 해수유동모델

1) 기본방정식

만내의 유체흐름은 조석, 담수유입 및 바람에 의해 좌우된다. 종래의 유동 시뮬레이션에서는 조석만을 고려하는 경우가 많았으나, 해역에 있어서 물질순환은 잔차류성분에 영향을 많이 받으므로[11] 조석류 및 잔차류성분을 고려하여 모델화되었고, 기본 방정식은 다음과 같다.

① 운동방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + f_o v - g\frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{g}{\rho}\int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial x}\,dz - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p_a}{\partial x}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x}\left(N_x \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(N_y \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(N_z \frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial}{\partial y}(v^2) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) - f_o u - g\frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{g}{\rho}\int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial y}\,dz - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p_a}{\partial y}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x}\left(N_x \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(N_y \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(N_z \frac{\partial v}{\partial z}\right)$$

② 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

③ 자유표면(조위) 방정식

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{-\partial}{\partial x}\left(\int_{-H}^{\xi} u dz\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\int_{-H}^{\xi} v dz\right)$$

④ 열수지 방정식 (온도의 확산방정식)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uT) - \frac{\partial}{\partial y}(vT) - \frac{\partial}{\partial z}(wT)$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

⑤ 염소량 수지방정식 (염소량 확산방정식)

$$\frac{\partial Cl}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u \cdot Cl) - \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot Cl) - \frac{\partial}{\partial z}(w \cdot Cl)$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \cdot \frac{\partial Cl}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \cdot \frac{\partial Cl}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \cdot \frac{\partial Cl}{\partial z}\right)$$

⑥ 상태방정식

$$\rho = \rho\,(\mathrm{Cl}, \mathrm{T})$$

여기서 u, v, w : X,Y,Z방향의 유속성분(cm/s ec)

ζ : 평균수면에서 자유표면까지의 높이(cm)

H : 평균수면에서 해저까지의 깊이(cm)

ρ : 유체밀도(g/cm³)

f_0 : 코리올리 인자(sec^{-1})

g : 중력가속도(cm/sec^2)

P_a : 대기압($g/cm \cdot sec^2$)

T : 수온(℃)

Cl : 염소량(‰)

N_x, N_y, N_z : x, y, z 방향의 渦動粘性係數(cm²/sec)

K_x, K_y, K_z : x, y, z 방향의 渦動擴散係數(cm²/sec)

k_x, k_y, k_z : x, y, z 방향의 熱擴散係數(cm²/sec)

2) 경계조건

육지 경계를 따라 직각방향의 유속은 없는 것으로 가정하였고, 온도와 염소량은 육지

와의 교환을 고려치 않았다. 자유표면 ζ에는 침입하는 조석파의 파동을 正弦函數로 고려하였다. 자유표면의 점성응력 및 해저의 점성응력은 Bulk공식에 의해 수식화하였다. 층간의 전단응력은 유속에 의한 연직전단만을 표현하고 밀도의 연직경사는 고려하지 않은 실험식을 이용하였다.

2.2 물질순환모델

Fig. 2은 저차생산자의 계만을 대상으로한 연안 해양생태계내 물질순환으로서 탄소와 질소 및 인의 흐름을 나타낸 것이다. 이 모델은 기존의 생태학 연구로부터 알고 있는 내

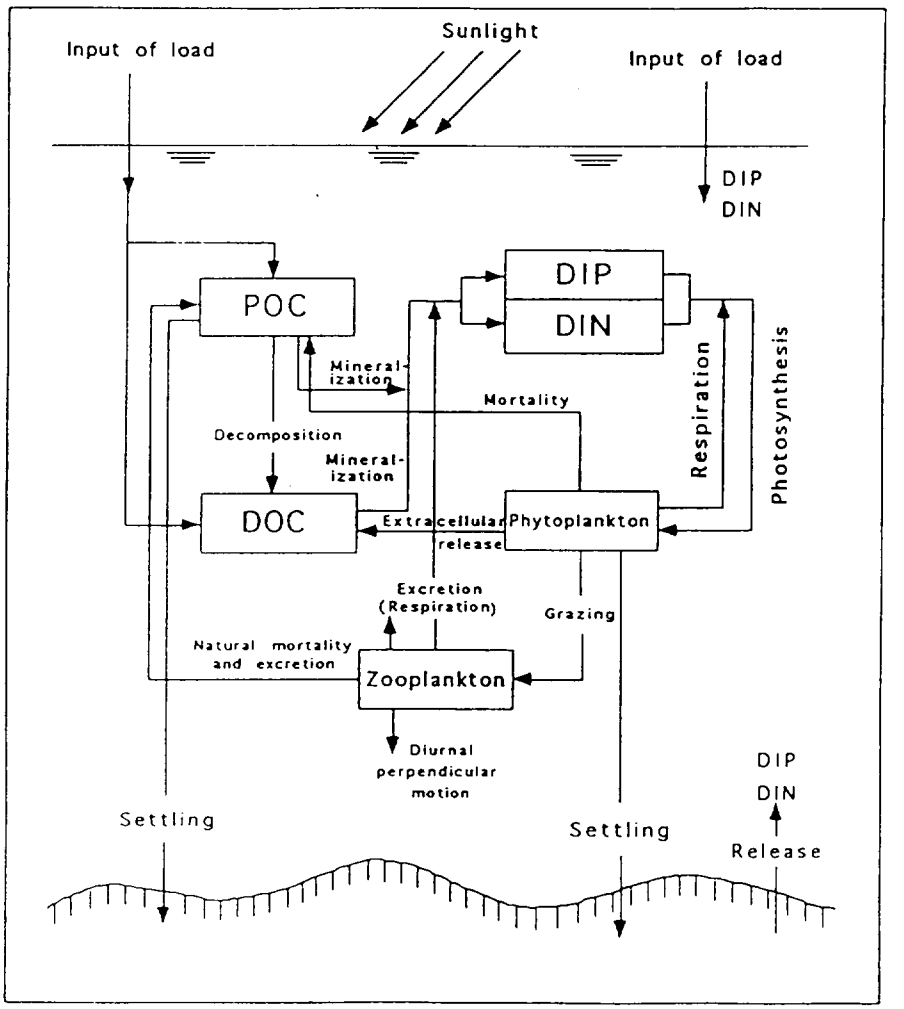

Fig. 2. The schematic diagram for the cycle of nutrients (N and P) in the marine ecosystem.

용을 총괄하여 시스템 공학적인 방법으로 물질순환을 수치적으로 해석한 것이고 생태계 내 물질의 보존을 나타내는 미분방정식으로 구성되어 있지만, 순환 경로의 하나하나가 실험이나 관측사실로부터 유도된 경험에 따르고 있고, 메카니즘은 있어도 유체역학 모델과 같은 물리법칙에 근거한 모델과는 성격이 다르다. 생태계의 구성 요소로서 4개의 유기태 요소, 2개의 무기태 요소 및 2개의 수질 요소가 있는데, 유기태의 구성 요소에는 식물플랑크톤(P), 동물플랑크톤(Z), 현탁태 비생물 유기물(detritus, POM) 및 용존태 유기물(DOM)이 있고 무기태의 구성 요소에는 인산인(DIP)과 용존성 전무기질소(DIN)가 있으며 수질의 구성 요소로서 용존산소(DO)와 화학적 산소요구량(COD)이 정의되어 있다.

해역의 임의의 지점에 있어 구성 요소의 현존량 B의 시간에 따른 농도변화를 기술한 방정식은 다음과 같다.

$\frac{\partial B}{\partial t}$ = 이류 + 확산 + 생물·화학적 변화량

$$= -u\frac{\partial B}{\partial x} - v\frac{\partial B}{\partial y} - w\frac{\partial B}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left[K_x\frac{\partial B}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_y\frac{\partial B}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K_z\frac{\partial B}{\partial z}\right] + \frac{\partial B}{\partial t}$$

여기서, B = 구성 요소의 현존량

t = 시간

u, v, w = x, y, z방향의 유속성분

Kx, Ky, Kz = x, y, z방향의 와동확산계수

$\partial B/\partial t$ = 모든 생물·화학적 과정에 의한 단위시간당 구성 요소의 변화량

상기의 확산방정식에는 만내 흐름에 의한 물질수송(이류)을 계산함에 있어 물질순환 모델은 다층유동모델과 연결되어 있다. 유동모델의 시뮬레이션에서 계산된 유속성분(u,v,w)을 물질순환모델에 입력하여 각 구성 요소의 현존량이 시간적, 공간적인 변화에 따라 예측된다.

1) 수식화

① 인산염 구성 요소 (DIP ; μg-at/ℓ)

$\frac{d(DIP)}{dt}$ = -식물플랑크톤에 의한 섭취 + 식물플랑크톤의 호흡 + 동물플랑크톤의배설 + 현탁태 유기물의 분해 + 용존태 유기물의 무기화 + 계외로부터 공급

② 용존성 전무기질소 구성 요소 (DIN ; μg-at/ℓ)

용존성 전무기질소(DIN)는 암모니아질소(NH_4^+-N), 아질산질소(NO_2^--N), 질산질소(NO_3^--N)의 합이고, 각 형태의 구별은 고려하지 않았다.

$$\frac{d(DIN)}{dt} = -\text{식물플랑크톤에 의한 섭취} + \text{식물플랑크톤의 호흡} + \text{동물플랑크톤의 배설} + \text{현탁태 유기물의 분해} + \text{용존태 유기물의 무기화} + \text{系外로부터 공급}$$

③ 화학적 산소요구량 구성 요소 (COD ; mg/ℓ)

생물과정의 수식화를 통해서 해역내의 各 態의 유기물에 대한 단위시간당의 증감량으로 구한다.

Ⅲ. 結果 및 考察

1. 수질 현황 조사

1994년 2월부터 12월까지 해양수질 분석 결과는 Table 1에 나타내었다.

염분분포는 전 조사기간을 통하여 전 조사지점에서 19.53~34.90‰범위로 시기 별로는 하계인 8월이 가장 낮고 동계인 2월과 춘계인 4월이 높은 농도를 보였다. 지점별로는 용호천, 대연천 하구역과 수영강 하구역이 하천수 유입의 영향으로 낮은 농도를 보였으며 외해 쪽으로 갈수록 점차 높은 농도를 보였다.

생물의 서식, 양식 및 산란에 적합한 환경의 지표로 사용되는 용존산소 분포는 전 조사기간을 통하여 전 조사지점에서 1.2~9.8mg/ℓ범위로 시기 별로는 추계인 10월이 가장 낮고 동계인 2월과 12월, 춘계인 4월이 높은 농도를 보였다. 이것은 계절에 따른 수온 상승에 의한 것으로 사료되고, 지점별로는 용호천, 대연천 하구역과 수영강 하구역이 하수 유입의 영향으로 항상 낮은 낮은 농도를 보였으며 하수 처리 등 수질관리대책이 요구되며 외해 쪽으로 갈수록 점차 높은 농도를 보였다. 특히 조사기간 중 6월 28일에 관측한 값인 용호천 하구 St. 2 와 수영강 하구 St. 8에서 측정한 용존산소의 농도를 보면, 각각 1.2mg/ℓ와 1.7mg/ℓ로 하수의 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다.

해역에서 유기오염의 일반 지표인 COD 분포는 전 조사기간을 통하여 전 조사지점에서 1.38~7.68mg/ℓ범위로 시기 별로는 다른 계절에 비해 하천 유출량이 많은 하계인 8월이 가장 높았다. 그리고 하수가 유입되는 하구를 제외한 수영만 전역에서 춘계에는 Ⅱ등급

수질이고 하계와 추계에는 Ⅲ등급 수질을 보였다. 지점별로는 용호천, 대연천 하구역과 수영강 하구역이 하천수 유입의 영향으로 높은 농도를 보였으며 외해 쪽으로 갈수록 점차 낮은 농도를 보였다. 특히 조사기간 중 12월 3일에 관측한 용호천 하구 St. 2에서 값은 7.68㎎/ℓ으로 매우 높고 4월 30일에 관측한 수영강 하구 St. 8 에서 값은 5.84㎎/ℓ로 하천의 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다. 따라서 하천수의 유입으로 오염이 심화될 것으로 예상이 되므로 수질관리 대책이 시급히 추진되어야 할 것이다.

해수 중 현탁입자의 농도를 나타내는 부유물질분포는 전 조사기간을 통하여 전 조사지점에서 3.01~32.73㎎/ℓ 범위였다. 시기 별로는 하계인 8월이 가장 높으며 만내에는 Ⅱ등급 이하의 수질을 보이며 나머지 기간에는 Ⅰ등급 이하의 수질을 보였다. 지점별로는 2월의 경우, 용호천과 수영강이 유입되는 곳인 St. 7과 St. 8에서는 각각 8.35㎎/ℓ와 12.73㎎/ℓ의 값을 보여 하구 해역이 다소 높게 나타났다. 8월에 용호만 안쪽의 St. 1, St. 2 그리고 St. 3의 표층에서 농도는 각각 20.37㎎/ℓ, 15.42㎎/ℓ 그리고 11.18㎎/ℓ로 상당히 높은 농도를 보이고 특히 12월의 경우 용호천이 유입되는 St. 2에서 32.73 ㎎/ℓ로 높은 값을 보여 하천의 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다.

해역의 부영양화에 관계되며 영양염중 암모니아 질소, 아질산 질소 그리고 질산 질소의 합계량으로 나타내는 총무기질소분포는 전 조사지점에서 0.071~8.413㎎/ℓ 범위이고, 해역

Table. 1. Range, mean values of water quality and eutrophication index in Suyeoung Bay(1994).

Constituent	Unit		Month					
			February	April	June	August	October	December
Salinity	‰	Range	29.22~34.90	21.74~34.63	19.53~34.64	24.21~30.89	23.21~32.38	21.45~33.81
		Mean	33.70	33.39	30.63	29.49	31.20	32.31
DO	㎎/ℓ	Range	5.1~9.2	8.0~9.4	1.2~8.9	4.0~7.0	4.4~7.0	5.9~9.8
		Mean	8.3	8.6	6.5	6.2	6.2	8.45
COD	㎎/ℓ	Range	1.38~4.70	1.46~5.84	1.48~5.46	1.66~4.03	1.66~4.03	1.64~7.68
		Mean	2.11	2.19	2.40	2.56	2.56	2.56
SS	㎎/ℓ	Range	4.49~12.73	3.04~11.86	3.10~14.75	3.01~8.59	3.01~8.59	4.48~32.73
		Mean	7.22	5.81	6.88	5.54	5.54	7.76
DIN	㎎/ℓ	Range	0.210~4.487	0.071~7.346	0.152~8.297	0.112~5.223	0.112~5.223	0.144~8.413
		Mean	1.000	0.680	1.82	0.840	0.840	1.136
DIP	㎎/ℓ	Range	0.012~0.190	0.012~0.398	0.014~0.391	0.005~0.220	0.005~0.220	0.024~0.496
		Mean	0.050	0.049	0.097	0.040	0.040	0.086

에는 지점별로는 용호천, 대연천 하구역과 수영강 하구역이 하천수 유입의 영향으로 1㎎/ℓ 이상의 높은 농도를 보였으며 외해쪽으로 갈수록 점차 낮은 농도를 보였다. 시기 별로는 전 계절에 걸쳐 전 해역이 Ⅲ등급에 해당되는 농도를 보여 부영양단계에 있었다.

인산 염의 경우 전 조사기간을 통하여 전 조사지점에서 0.005~0.496㎎/ℓ 범위로 시기별로는 추계인 10월이 가장 낮았다. 지점별로는 용호천, 대연천 하구역과 수영강 하구역이 하천수 유입의 영향으로 높은 농도를 보였으며 외해쪽으로 갈수록 점차 낮은 농도를 보였으며 총무기질소 분포와 같은 양상을 보였다.

2. 모델의 입력자료

2.1 해수유동모델

해수유동모델의 입력 조건은 Table 2에 나타내었다. 본 조사의 모델 계산영역은 용호만을 중심으로 수영만까지 대상해역으로 하였다. 해양 개방경계로는 서쪽의 이기대를 시작으로 동쪽의 해운대 해수욕장까지를 잇는 선을 개경계로 하였다. 그리고 수영만의 해안선 굴곡을 충분히 고려할 수 있도록 x, y 방향의 격자크기를 각각 100m로 하였으며 층 구분은 1층(0~2m), 2층(2~4m), 3층(4~8m) 그리고 4층(8m이하)으로 나누어 유동특성을 재현하였고 계산되는 총 격자수는 14000개 (70 × 50 × 4)로서 구성하였다.

개방경계에서의 조위입력 조건은 수영만에서 조사된 개경계에서 M2조를 평균조석으로 하여 개경계에서 진폭과 위상은 이기대 남단은 34.04cm, 75.6° 와 해운대는 31.78cm, 73.8° 를 적용하였고, 두 지점사이의 각 격자점의 진폭과 위상은 보간법에 의해 계산하여 적용하였다.

해저마찰계수는 심해의 최적치로서 일반적으로 해의 안정성을 주는 R=0.0026를 적용하였다[12] . 수평확산계수는 여러 관측자에 의해 보고되고 있는데 김[13]이 수영만에 적용한 $1\times10^{5}cm^{2}/sec$를 이용하였다.

하천은 수영만으로 유입되는 6개 하천을 고려하였다. 6개의 하천은 수영강, 우동천, 광안천, 대연천, 용호천 그리고 춘천으로 수영강, 우동천, 광안천, 대연천 그리고 용호천의 유량은 1994년 같은 조사해역으로 유입되는 수질오염원 조사를 행하여 측정된 유량을 평균하여 이용하였고 춘천의 경우는 1992년에 조사한 유량[14]을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

Table 2. Input data for the hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	Δx=Δy=100m
Total mesh value	70×50×4=14,000
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	4sec
Level	1: 0~2m
	2: 2~4m
	3: 4~8m
	4: below 8m
Tidal level and degree at open boundary	Left : 34.04cm, 75.6°
	right: 31.78cm, 73.8°
River flow	
Suyeong river	514,000 m³/d
Kangan stream	5,800 m³/d
Daeyeon stream	44,000 m³/d
Youngho stream	58,000 m³/d
Chun stream	3,630 m³/d
Udong stream	20,700 m³/d
Water temp. and chlorinity at open boundary	1: 20℃, 18.5‰
	2: 20℃, 18.5‰
	3: 20℃, 18.5‰
	4: 20℃, 18.5‰
Coriolis coefficient	f=2 w sinΦ
Surface friction coefficient	0.0013
Internal friction coefficient	0.0013
Bottom friction coefficient	0.0026
Horizontal viscosity coefficient	1.0E5 (cm^2/s)
Horizontal diffusion coefficient	1.0E5 (cm^2/s)
Calculation time	4 tidal cycle

2.2 물질순환모델

물질순환모델에 적용한 입력자료는 Table 3에 나타내었다. 물질순환모델은 해수유동모델에서 얻어진 유속 및 조위가 정상상태에 도달한 후 한 조석주기에 대한 평균유속을 구해 물질순환모델의 기본 유동자료로 이용하였다. 물질순환모델의 격자는 해수유동모델에 적용한 격자와 동일하게 적용하였다. 모델에 기본적인 입력자료로 이용되는 해수유동은 물질 분포에 관계하는 잔차류성분을 이용하여 시뮬레이션을 행하였다. 오염부하량 중 하천오염부하량은 해수유동모델에 적용한 유량에 조사지역에서 조사한 하천수의 농도를

곱하여 입력조건으로 하였다. 또한 춘천의 경우는 1992년 조사한 유량과 농도를 곱하여 추정하였다. 그리고 초기조건과 경계조건은 동 조사지역에서 실측한 범위내의 값을 이용하였다.

오염물질의 확산영향은 해역에서 유기오염의 일반지표인 화학적 산소요구량(COD)과 해역의 부영양화에 관계되는 총무기질소(DIN)과 인산 인(DIP)을 시뮬레이션하였다.

Table 3. Input data for the material cycle model.

Parameter	Input values			
Mesh size	$\Delta x=\Delta y=100m$			
Water depth	chart datum + MSL			
Time interval	200sec			
Pollutant loadings				
	Flow(m³/d)	COD	DIP	DIN
		ton/d	kg/d	
Suyeong river	514,000	9.510	318.7	4163.4
Udong stream	20,700	0.334	11.36	97.3
Kangan stream	5,800	0.181	7.25	48.6
Daeyeon stream	44,000	1.221	51.92	469.5
Youngho stream	58,000	2.997	101.50	1023.1
Chun stream	3,630	0.049	3.78	26.4
Initial condition for compartments				
Level		COD (mg/ℓ)	DIP (μg-at/l)	DIN
1		2.5	0.5	10.0
2		2.5	0.5	10.0
3		2.5	0.3	6.0
4		2.0	0.4	4.0
Boundary condition for compartments				
level		COD	DIP	DIN
1		2.0	0.4	10.0
2		2.0	0.4	10.0
3		2.0	0.3	8.0
4		2.0	0.4	4.0
Calculation time		20 tidal cycle		

3. 해수유동과 물질순환모델 시뮬레이션

3.1 해수유동 시뮬레이션

3차원 해수유동모델의 현지 적용성을 검토하기 위해 유동장을 재현하였다. 총 계산시간은 4조석이며, 임의 지점에서 유향 변화를 조사한 결과, 2조석이 경과하면서 안정상태에 도달하였다. 따라서 4조석에서 마지막 한 조석에 대하여 매 20분 간격으로 조석류와 잔차류를 조사하였다. 해수유동 시뮬레이션 결과의 타당성을 검토하기 위해 대표지점에서 조류타원도의 계산 결과와 관측치를 비교하였다. 김[13]이 수영만 중앙부에서 1989년 10월 16~17일 관측한 조류타원도와 계산된 결과를 Fig. 3에 나타내었는데, 관측치와 계산치의 조류타원 방향은 거의 일치하고 진폭은 계산치가 좀 작게 나타나나 본 결과는 수영만의 현재 유동을 유사하게 재현하고 있음을 알 수 있다. 그리고 본 시뮬레이션에서 계산된 표층에서의 조석류는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었고 잔차류의 계산 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

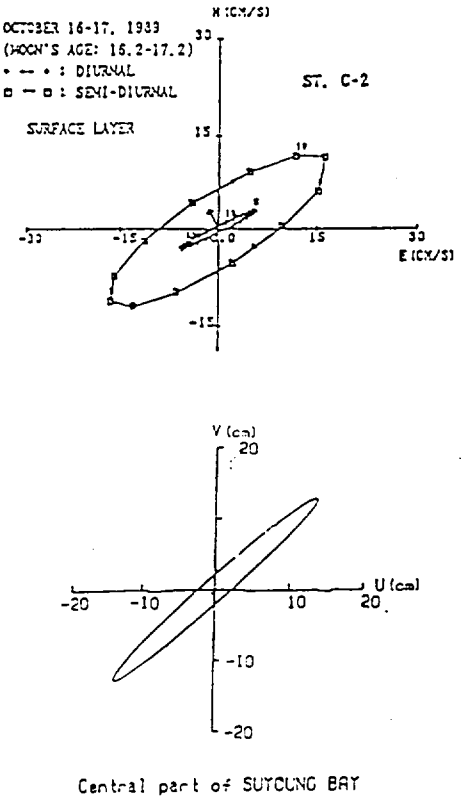

Fig. 3. Comparison of tidal current ellipses between computed and observed results.

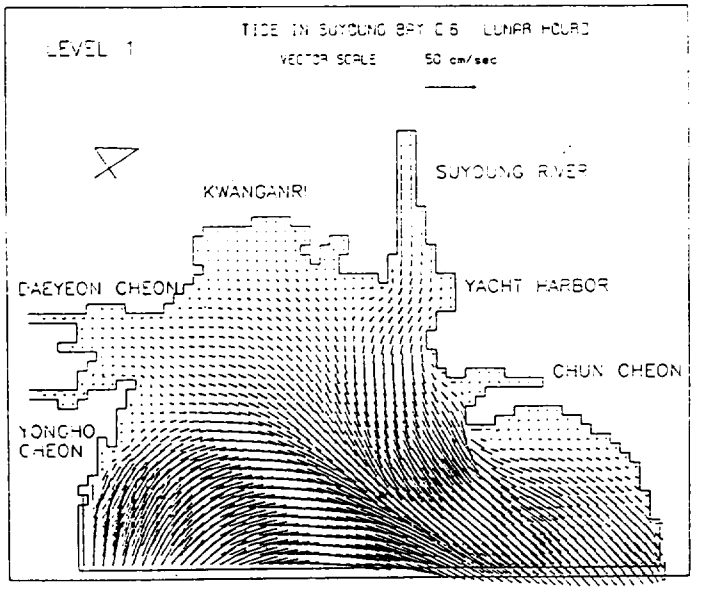

Fig. 4. Computed velocity field at 1st level during the ebb tide.

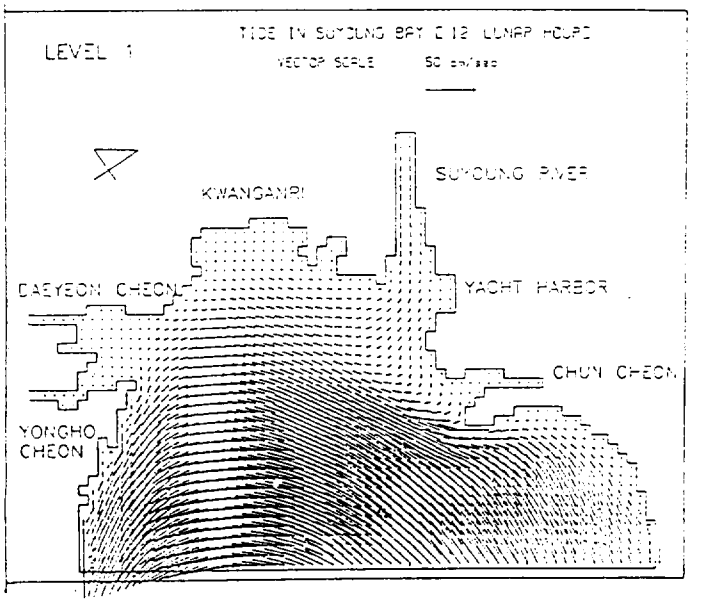

Fig. 5. Computed velocity field at 1st level during the flood tide.

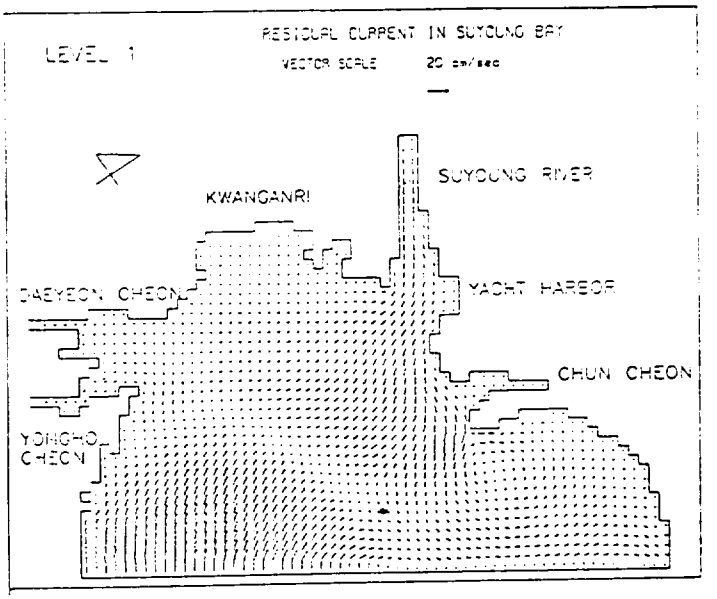

Fig. 6. Computed residual currents at 1st level.

낙조시 유동 패턴을 보면 이기대 남단에서 유입된 해수가 수영만 중심부를 향해 강하게 북동진하다가 해운대 지역으로 이동하여 빠져 나가는 패턴을 보여주고 있으며, 광안리 해수욕장에서의 유속은 매우 약한 것을 알 수 있다. 창조시 유동 패턴을 보면, 낙조시와는 반대의 유동 패턴을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

수영만에서 잔차류의 패턴을 보면 해운대 앞쪽에서 반 시계 방향의 환류가 형성되는 것을 알 수 있다.

3.2 물질순환모델 시뮬레이션

1) COD 확산 시뮬레이션

COD 확산 시뮬레이션이 실제 수영만에서 잘 적용되는가를 검토하기 위해 2월에서 8월까지 용호만을 포함한 수영만 총 15개 지점에서 관측한 COD 값을 평균하여 계산한 결과와 비교하였고 표층의 경우 그 비교값을 Fig. 7에 나타내었다.

계산치와 실측치의 상관관계는 0.920으로 지점별로 매우 높은 상관관계를 보여주고 있으며 상대오차는 11.72%로 나타내어 매우 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

육상오염부하로 유입이 되는 하천수나 하수의 경우는 담수로서 밀도가 해수에 비해 낮으므로 실제 해양으로 유입이 되었을 때 표층으로 퍼져나갈 것이다. 따라서 여기서는 오염물질의 확산 분포를 표층인 1층의 분포를 Fig. 8에 나타내었다.

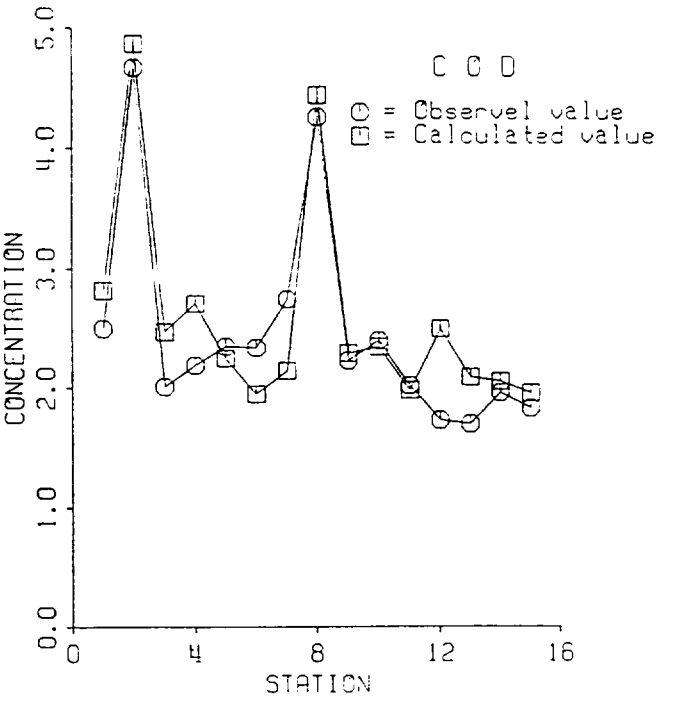

Fig. 7. The comparison of calculated with the observed COD at 1st level in Suyeong Bay.

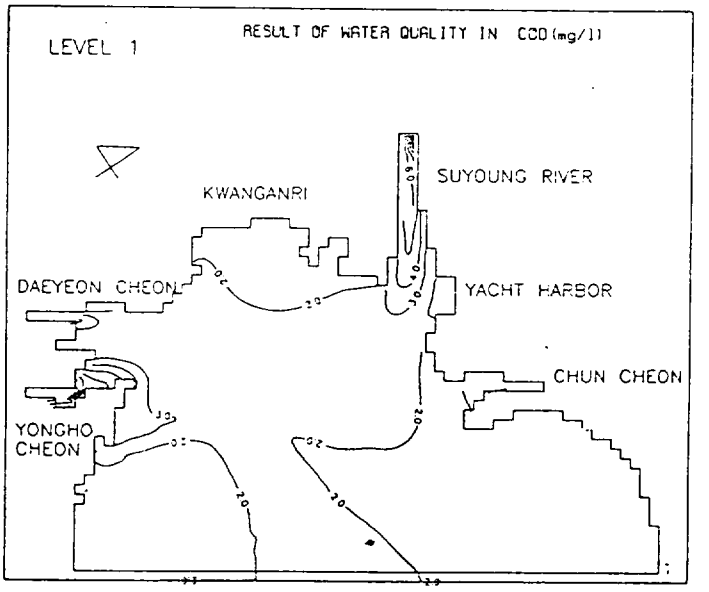

Fig. 8. The distribution of COD in Suyteong Bay.

COD 분포를 보면 용호천, 대연천 하구해역과 수영강 하구 해역이 3㎎/ℓ이상으로 높은 농도를 보이는 것을 알 수 있으며 이 값은 해역 수질 등급 Ⅲ에 해당되는 값이다. 그리고 수영강과 용호천 그리고 대연천에서 나오는 하수는 해수유동에 의해 수영만의 중심부의 전역에 퍼져 가는 것을 알 수 있었다.

2) 총무기질소 확산 시뮬레이션

총무기질소 확산 시뮬레이션이 실제 수영만에서 잘 적용되는가를 검토하기 위해 2월에서 8월까지 용호만을 포함한 수영만 총 15개 지점에서 관측한 총무기질소의 값을 평균하여 계산한 결과와 비교하여 그 비교값을 Fig. 9에 나타내었다.

계산치와 실측치의 상관관계는 0.899로 지점별로 높은 상관관계를 보여주나 특히 용호만 하구나 수영강 하구의 실측치보다는 낮은 값을 나타내는 것을 알수 있으나 2월에 측정된 값과는 거의 같은 값을 보였다. 상대오차는 53.6%로 나타내어 상대오차는 큰 것으로 나타났는데 이것은 용호천과 수영강의 영향을 받는 St. 3과 St.8값으로 인한 것으로 이 값을 제외한다면 상대오차 22.0%로 낮아지는 것을 알 수 있다.

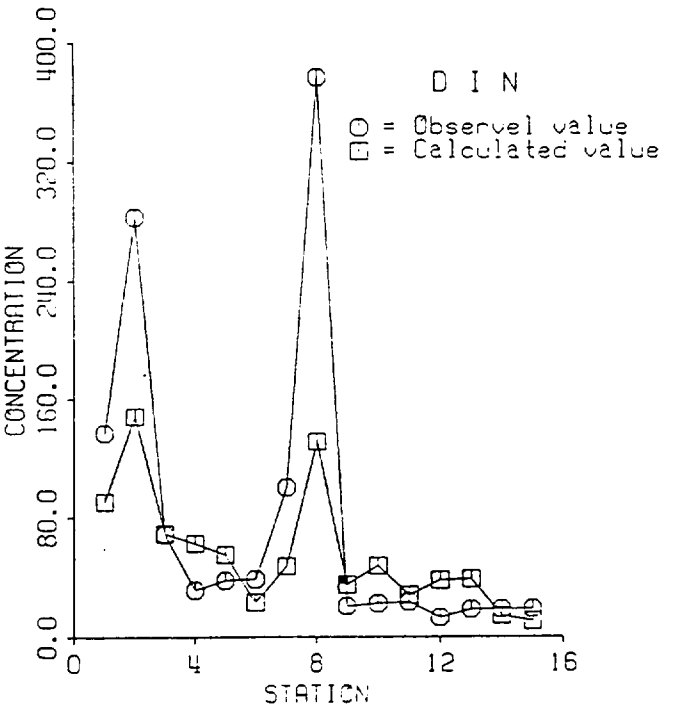

Fig. 9. The comparison of calculated with the observed DIN at 1st level in Suyeong Bay.

총무기질소의 분포는 Fig. 10에 나타내었다. 분포특성을 보면 용호천, 대연천 하구해역과 수영천 하구해역에서 60μg-at/ℓ 이상의 높은 농도를 보이고 있는 것을 알 수 있고 수영만 전역은 적조를 유발시킬 수 있는 총무기질소 농도 7.1μg-at/ℓ를 초과하여 수질환경이 악화되는 것을 알 수 있다.

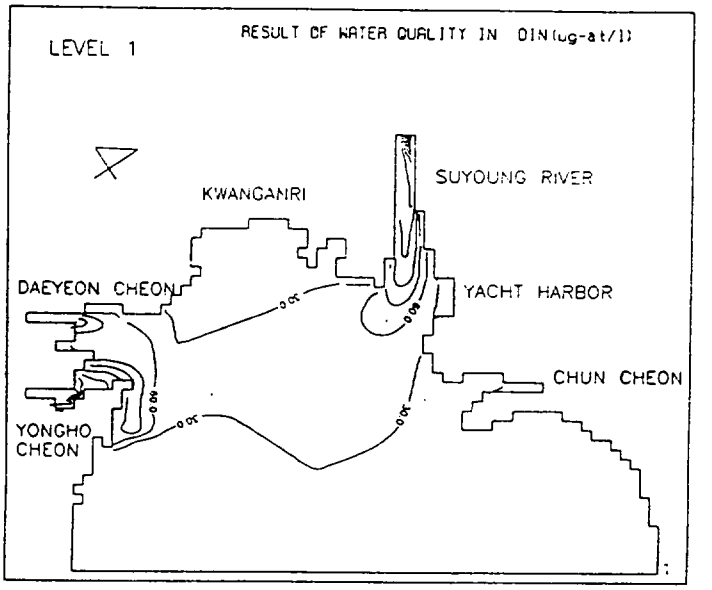

Fig. 10. The distribution of DIN in Suyeong Bay.

3) 인산 인 확산 시뮬레이션

인산 인도 화학적 산소요구량과 마찬가지로 표층에서의 분포를 비교하였으며 인산 인 확산이 실제 수영만에서 잘 적용되는 가를 검토하기 위해 2월에서 8월까지 용호만을 포함한 수영만 총 15개 지점에서 관측한 인산 인의 값을 평균하여 계산한 결과와 비교하여 그 비교값을 Fig. 11에 나타내었다.

계산치와 실측치의 상관관계는 0.837로 지점별로 높은 상관관계를 보여주나 수영강 하구의 실측치보다는 낮은 값을 보여주는 것을 알 수 있으나 6월과 8월에 측정된 값보다는 높은 값을 보였다. 상대오차는 43.02%로 나타내어 상대오차는 큰 것으로 나타났다.

인산 인의 확산범위는 Fig. 12에 나타내었다. 인산인의 확산분포를 보면 수영강과 용호천의 하구역에 2.0μg-at/ℓ 이상의 높은 농도를 보여 하천수의 영향이 크게 나타나는 것을 알수 있으며 수영만 중심부는 Ⅲ등급을 항상 초과하는 현상이 예상되어 총무기질소와 더불어 부영양화를 발생시킬 우려가 있다.

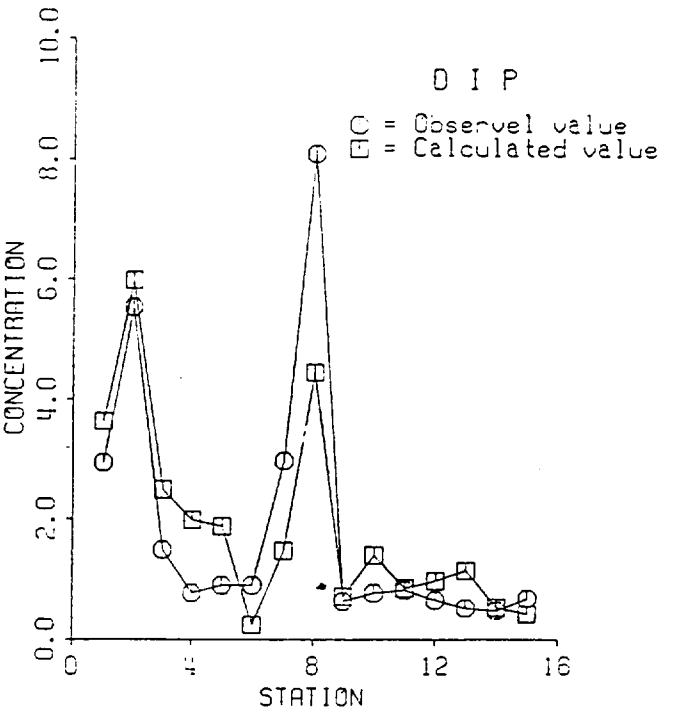

Fig. 11. The comparison of calculated with the observed DIP at 1st level in Suyeong Bay.

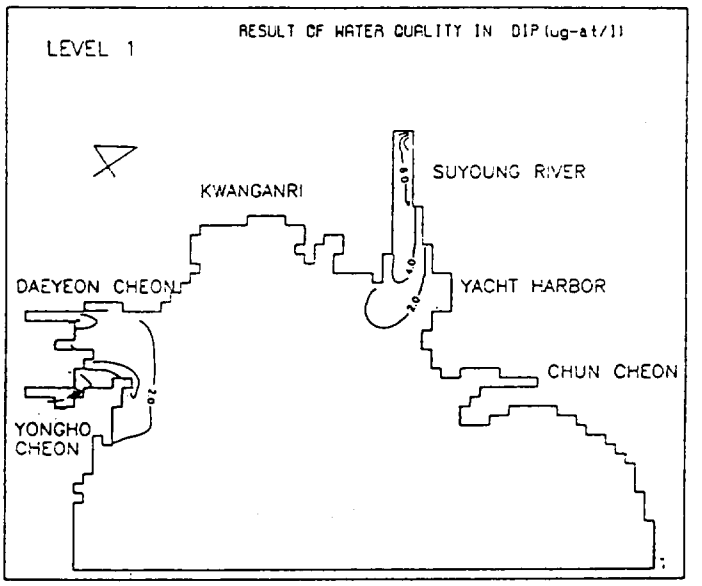

Fig. 12. The distribution of DIP in Suyeong Bay.

Ⅳ. 結　　論

물질순환모델을 이용하여 각 하천에 대한 오염부하의 영향을 예측 평가하였다. 그리고 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

3차원 해수유동모델에 의한 결과를 보면 관측치와 계산치의 조류타원 방향은 거의 일치하고 진폭은 계산치가 좀 작게 나타나나 수영만의 현재 유동을 유사하게 재현하고 있음을 알 수 있었고 낙조시 유동 패턴을 보면 이기대 남단에서 유입된 해수가 수영만 중심부를 향해 강하게 북동진하다가 해운대 지역으로 이동하여 빠져 나가는 패턴을 보여주고 있으며 창조시 유동 패턴을 보면 낙조시와는 반대의 유동 패턴을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

물질순환모델을 이용하여 COD와 총무기질소와 인산인의 확산 영향을 예측한 결과를 보면 우선 COD의 경우, 계산치와 실측치의 상관관계가 0.920으로 매우 높고 상대오차는 11.72%로 낮아 확산영향을 매우 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있으며 분포특성을 보면 용호천, 대연천 하구해역과 수영강 하구 해역이 3㎎/ℓ이상으로 높은 농도를 보이는 것을 알 수 있었다. 총무기질소의 경우, 계산치와 실측치의 상관관계는 0.899로 지점별 높은 상관관계를 보여주며 분포특성을 보면 용호천, 대연천 하구해역과 수영천 하구해역에서 60 ㎍-at/ℓ이상의 높은 농도를 보이고 있는 것을 알 수 있고 수영만 전역은 적조를 유발시킬 수 있는 총무기질소 농도 7.1㎍-at/ℓ를 초과하여 수질환경이 악화되는 것을 알 수 있었다. 그리고 인산인의 경우, 계산치와 실측치의 상관관계는 0.837로 지점별 높은 상관관계를 보여주며 분포특성은 수영강과 용호천의 하구역에 2.0㎍-at/ℓ 이상의 높은 농도를 보여 하천수의 영향이 크게 나타나는 것을 알수 있으며 수영만 중심부는 Ⅲ등급을 항상 초과하는 현상이 예상되어 총무기질소와 더불어 부영양화를 발생시킬 우려가 있다.

물질순환모델을 적용한 이상의 결과는 수영만으로 유입되는 각 하천의 오염부하저감계획을 수립하거나 수영만의 수질관리를 하는데 기초자료로서 이용할 수 있을 것이다.

V. 參 考 文 獻

1. 조은일,이석모,박청길 : 수영만 수질에 미치는 비점원 오염부하의 특성과 영향. 한국수산학회지, 제28권 3호, 279~293, 1995.
2. 김종구 : 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링. 부산수산대학교 박사학위논문, 1~130, 1994.
3. Thomann, R.V. : Estuarine water quality management and forecasting. *J.ASCE*, vol 5, 1964.
4. Leendertse, J.J. A water-quality simulation model for well mixed estuaries and coastal Seas: Vol. 2 Computation procedures. Rep. R-708-NYC, The Rand Corp., Santa Monica, California, 1~15, 1971.
5. Leendertse, J.J. and S.K. Liu : A three-dimensional model for estuaries and coastal seas. Vol. II, Aspects of computation, *Report No. R-1764-OWRT*, The Rand Corporation, California, USA, 1975.
6. Leendertse, J.J. and S.K. Liu : A three-dimensional model for estuaries and coastal sea. Vol.IV Turbulent energy computation, *Report No. R-2187-OWRT*, The Rand Corporation, California, USA, 1977.
7. 堀口孝男富田 勇堀江 毅 : 三次元モデルによる流れと擴散の 數値解法. 第24回 沿岸工學講演會 論文集, 443-447, 1977.
8. 中田喜三郎 石川公敏 松川康夫 : 內灣の流動場の數値實驗. 沿岸海洋ノート, 27(2), 96-108, 1985.
9. Hayter, E.J. and C.V. Pakala : Transport of inorganic contaminants in estuarian waters. *J. Coast. Res.*, Spec. Iss., 5, 217-230, 1989.
10. 정연철,여석준 : 수영만의 해수유동 및 확산에 관한 수치모델링, 한국수산학회지, 제25권 2호, 133~143, 1992.
11. Yanagi, T : Contributions. Geophysical Institute, Kyoto University. 14, 1~10, 1974.
12. 해양연구소 : 연안환경 보전기술 개발연구. BSPG0083-242-4.
13. 김차겸, 이종섭 : 하구에서 Two-level 모델에 의한 해수유동 및 확산에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 제24권, 1호, 52~58, 1991.
14. 조은일 : 수영만 수질모델링에 있어서 비점원 오염부하가 미치는 영향, 부산수산대학교, 석사학위논문, 1~82, 1993.